

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЗРЫВА ТВЕРДЫХ ВВ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев, В. И. Долгов  
(Москва)

К настоящему времени известно большое количество схем механического воздействия, в которых исследовалось возбуждение взрыва (часть из них приведена на рис. 1). Во всех случаях при этом зафиксирована довольно широкая область изменения параметров воздействия, где испытания носят вероятностный характер. Причины появления вероятностной картины испытаний до сих пор почти не изучались. Их исследование имеет, однако, принципиальное значение, так как не предлагалось еще ни одного механизма возбуждения взрыва, который бы основывался на статистических представлениях. В данной работе выясняется происхождение вероятностной зоны, а также изучаются критические условия возбуждения взрыва при деформации ВВ в замкнутом объеме. Объединение этих вопросов обязано применению одного экспериментального метода.

Будем считать, что критическими условиями возбуждения взрыва являются условия прочности и критических напряжений [1, 2]. Тогда появление вероятности должно быть связано с нерегулярностью выполнения по крайней мере одного из этих условий. Если при ударе существенный разброс имеет прочность зарядов [1], то при сдвиге условие прочности выполняется всегда (см. рис. 1, е, ж, з) и вероятность возбуждения взрыва должна быть не чем иным, как вероятностью реали-

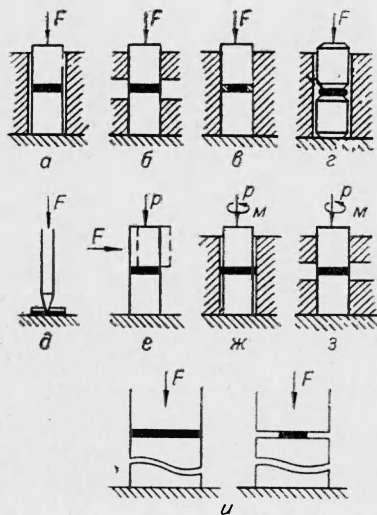


Рис. 1. Схемы испытания твердых ВВ на чувствительность к механическим воздействиям.

Метод: а — № 1 (Каст.); б — № 2 (Холево); в — № 3 (Холево); г — ГОСТ (вторичные); д — Велер (первичные); е — Козлов-Боуден; ж — № 1-П (Куприянов — Бочков); з — № 2-П (Куприянов — Бочков); и — Андреев — Теребилина.

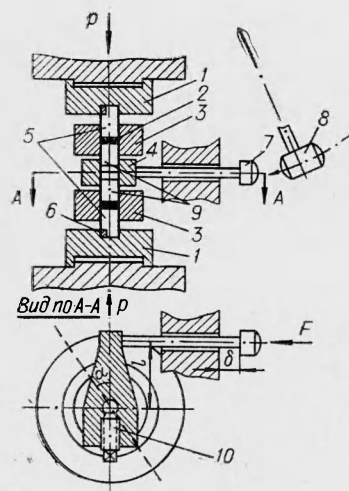


Рис. 2. Схема испытаний.

1 — держатель роликов; 2 — ВВ; 3 — муфта; 4 — рычаг; 5 — неподвижные ролики; 6 — шпонка; 7 — шпилька; 8 — груз (2 кг); 9 — подвижные ролики.

зации условия критических напряжений в образце. Разброс прочности при ударе и различие распределения напряжений при сдвиге, по-видимому, связаны с неоднородностью тонких образцов. В известных испытательных схемах, как правило, используются тонкие заряды, что связано с необходимостью достижения критических напряжений, намного превышающих прочность ВВ.

Единственной схемой из приведенных на рис. 1, где при неупругой деформации можно достигнуть высоких давлений, не ограничиваясь случаем тонкого слоя, является

прибор № 1-П. Однако с целью исключения влияния зазора на результаты испытаний предлагается проводить эксперименты при быстром сдвиге по схеме, приближенной к прибору № 3 (см. рис. 1, в), а именно без уплотнительного кольца (что исключает влияние трения металл — металл), но с обязательным условием соблюдения минимальности зазора между муфтой и роликами. Назовем этот прибор прибором № 3-П. Результаты испытаний по частоте взрывов для октогена и тэна, проведенные на маятниковом копре К-44-III по выбранной схеме (рис. 2), приведены на

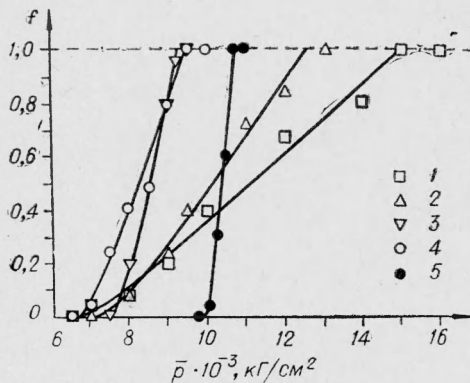


Рис. 3. Кривые частоты для октогена толщиной 0,23 (1), 0,5 (2), 1,0 (3), 2 мм (4) и трехслойного заряда тэна с янтарной кислотой толщиной 4 мм ( $h_{\text{тэн}} = 0,5$  мм) (5).

рис. 3. Угол сбрасывания составлял  $110^\circ$ , угол поворота  $25^\circ$ . Диаметр роликов во всех опытах был равен 10 мм, а зазор между роликами и муфтой  $10 \pm 5$  мк. Каждая точка на графике находилась из 25 опытов.

В связи с тем, что в лабораторных условиях было невозможно проводить опыты с зарядами ВВ толщиной более 2 мм, перешли к составным трехслойным зарядам (ВВ плюс инертное вещество).

На рис. 3 приведена кривая для тэна с янтарной кислотой. За счет использования составных зарядов удалось увеличить толщину образцов до 4 мм. При этом инертное вещество помещали в зону, которая не ответственна за возбуждение взрыва, а именно в середину заряда. Действительно, для того чтобы разрушить образец, на плоскостях разрушения которого образуются «горячие точки» [1], необходимо приложить соответствующий крутящий момент

$$M_{\text{пр}} = \frac{\pi}{2} \tau_{\text{пр}} R^3,$$

где  $R$  — радиус заряда;  $\tau_{\text{пр}}$  — предел прочности материала на сдвиг.

На сколь угодно малом расстоянии  $\Delta h$  от контактной поверхности разрушить образец труднее, так как необходимо преодолеть дополнительное трение вещества о стенки муфты. Крутящий момент в этой плоскости будет меньше, чем  $M_{\text{пр}}$  на величину

$$\Delta M = 2\pi \tau_{\text{пр}} R^2 \Delta h,$$

а касательное напряжение на окружности  $\tau_1$  достигает значения

$$\tau_1 = \tau_{\text{пр}} \left( 1 - 4 \frac{\Delta h}{R} \right) \quad (1)$$

( $\tau_1 \geq 0$ ).

Таким образом, ответственной за возбуждение взрыва является контактная поверхность заряда, и помещение инертного вещества в середину образца вполне обосновано. Для того чтобы исключить возможность разрушения по инертному веществу, последнее брали более прочным, чем ВВ.

Как видно из графиков (рис. 3), с увеличением толщины заряда происходит сужение кривых частоты, и на примере тэна (с янтарной кислотой в качестве инерта) получена узкая кривая частоты взрывов. Полученный результат можно рассматривать как прямое подтверждение нестатистического характера явления возбуждения взрыва при механических воздействиях.

Для октогена подобной узкой кривой не было получено, так как не удалось подобрать инертную основу.

Для оценки кривых частоты рассмотрим возможные случаи распределения напряжения по заряду ВВ (рис. 4):

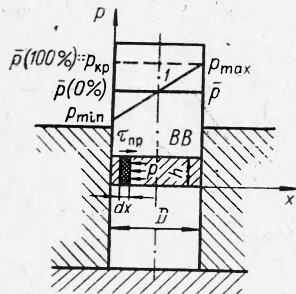


Рис. 4. Возможные случаи распределения напряжения по заряду ВВ.

а) плотность по заряду одинакова и тогда напряжение по всему заряду распределено равномерно. Если это напряжение равно критическому, то из серии опытов фиксируется 100% взрывов. Это так называемый верхний предел кривой частоты;

б) плотность по заряду неодинакова, и тогда напряжение по всему заряду распределено неравномерно. На отдельном участке (или участках) напряжение максимальное и больше, чем среднее по заряду.

Рассмотрим самый невыгодный случай (рис. 4, 1). Если максимальное напряжение достигло критического — произойдет взрыв (один или несколько случаев из всех возможных). Однако манометр при этом фиксирует среднее напряжение, которое ниже критического и должно отвечать за нижний предел на кривой частоты. С увеличением давления прижатия взрыв должен происходить и в тех случаях, когда напряжение по заряду распределено более равномерно. Процент взрывов возрастает. Исходя из равновесия сил на элементе заряда (см. рис. 4) и пользуясь методами обработки металлов давлением [3], получим величину области, в которой происходит переход от 0 взрывов к 100%:

Рассмотрим самый невыгодный случай (рис. 4, 1). Если максимальное напряжение достигло критического — произойдет взрыв (один или несколько случаев из всех возможных). Однако манометр при этом фиксирует среднее напряжение, которое ниже критического и должно отвечать за нижний предел на кривой частоты. С увеличением давлением прижатия взрыв должен происходить и в тех случаях, когда напряжение по заряду распределено более равномерно. Процент взрывов возрастает. Исходя из равновесия сил на элементе заряда (см. рис. 4) и пользуясь методами обработки металлов давлением [3], получим величину области, в которой происходит переход от 0 взрывов к 100%:

$$2\tau_{np} dx = hdp,$$

$$2\tau_{np} x = hp + c.$$

Пусть при  $x=0$  напряжение минимальное ( $p_{min}$ ), а при  $x=D$  — максимальное ( $p_{max}$ ). Тогда

$$p_{max} - p_{min} = \frac{2\tau_{np} D}{h}$$

и для ширины кривой частоты

$$\bar{p}(100\%) - \bar{p}(0\%) = \frac{\tau_{np} D}{h} = \frac{\tau_{np} D}{\sqrt{3} h}, \quad (2)$$

где  $\bar{p}(100\%)$  и  $\bar{p}(0\%)$  — давления прижатия, ответственные за 100% и 0% взрывов на кривой частоты,  $\text{кг/см}^2$ ;  $D$  и  $h$  — диаметр и высота заряда;  $\tau_{np}$  — предел прочности ВВ на сжатие,  $\text{кг/см}^2$ .

Из полученного выражения видно, что ширина кривой частоты

зависит от предела прочности ВВ, отношения  $h/D$  и не зависит от критического напряжения. При малых  $h/D$  вследствие плохой пропрессовки и большого разброса плотности распределение напряжений от заряда к заряду может сильно различаться, чем и объясняется большая ширина кривых частоты.

Однако расчет по формуле (2) плохо согласуется с экспериментом. Если расхождение всего лишь в 2 раза для октогена с  $h/D=0,2$  можно отнести за счет приближенного характера формулы, то для меньших  $h/D$  расчет ставит под сомнение количественную справедливость полученного выражения. Объяснение столь сильного расхождения может быть найдено, если обратиться к экспериментам по медленно нагружению зарядов ВВ в приборе № 2 [1]. Было показано, что уменьшение отношения  $h/D$  и рост величин прочности зарядов в условиях медленного нагружения приводит к развитию пластической деформации, сопровождающейся упрочнением. Поэтому формула (2) может подходить только для идеально пластического и хрупкого тела. Для пластически упрочняющейся среды требуется совместный учет пластических и упругих деформаций. Однако использовать решение упруго-пластической задачи для тонких слоев весьма трудно [4], так как остается неизвестным, до какого значения повышается предел текучести ВВ при прессовании в каждом конкретном случае. При этом зависимость  $h/D$  более сложна, но сохраняет ту же тенденцию. Для больших отношений  $h/D$ , по-видимому, величины относительных деформаций невелики и тем самым предел текучести не слишком сильно отличается от предела прочности, полученного при ударе.

В работе были проведены тензометрические измерения крутящего момента. Датчиком служила средняя часть шпильки, по которой производился удар.

На рис. 5 изображена шпилька-датчик и схема подключения ее к осциллографу. Градуировка производилась при ударе на вертикальном копре. Осциллограмма процесса, как видно из рис. 6, имеет такой же характер, какой бы она должна иметь при прочностном разрушении. Однако величина измеренного момента оказалась на порядок больше величины, необходимой для прочностного разрушения ВВ.

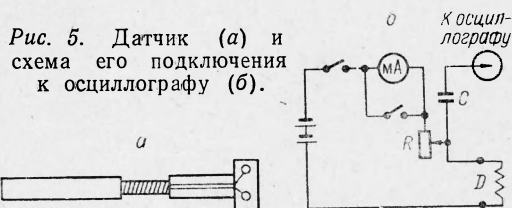


Рис. 5. Датчик (а) и схема его подключения к осциллографу (б).

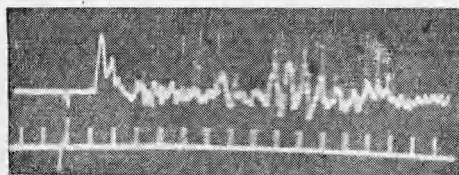


Рис. 6. Осциллограмма процесса сдвига.

Это объясняется тем, что основная энергия удара тратится на преодоление трения металла в муфте. Таким образом, осциллограмма не дает количественных сведений о ВВ, но дает качественную картину процесса.

В дальнейшем интересно было проследить, какое влияние оказывают на величину критического напряжения  $p_{кр}$  (за которое принимается 100%-ная точка на кривой частоты) те параметры воздействия, которые могут изменяться в применяющейся схеме испытаний, а именно угол сбрасывания груза и угол поворота системы. Как показали эксперименты, изменение скорости деформации (угол сбрасывания менялся от 110 до 180°) не сказывается на величине критического напря-

жения, что хорошо согласуется с представлением о механизме локального разогрева заряда ВВ как быстром самопроизвольном процессе.

Изменение угла поворота от  $25$  до  $3,5^\circ$  также не сказывается на величине критического напряжения. Отсюда можно сделать вывод, что образование эффективных очагов разогрева происходит в начальной стадии сдвига.

Таким образом, величина критического напряжения при быстром сдвиге в замкнутом объеме зависит только от толщины заряда  $h$

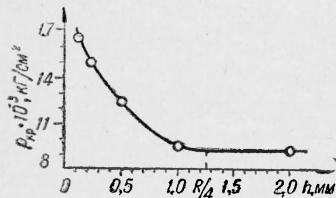


Рис. 7. Зависимость критического напряжения от  $h_{\text{ВВ}}$  (октоген).

(рис. 7). На графике дополнительно нанесена экспериментальная точка, полученная для октогена с навеской  $15 \text{ мг}$  ( $h = 0,12 \text{ мм}$ ). Влияние толщины заряда ВВ на критическое напряжение может быть понято исходя из следующих соображений. При копровых испытаниях на удар  $p_{\text{кр}}$  считали постоянной. В условиях наших испытаний разрушение не сопровождается сбросом давления, как в случае удара и время существования горячего очага может изменяться в широких пределах. Тогда критические условия воспламенения по теории теплого взрыва [5] определяются только температурой и размером очага. Температура очага задается температурой плавления, соответствующей приложенному давлению. Размер же очагов растет с увеличением запасенной в образце упругой энергии, которая при однородном сдвиге до напряжения  $\tau$ , исходя из закона Гука и выражения элементарной работы, равна

$$dW = \frac{\tau^2 S dh}{2G},$$

где  $S$  — площадь заряда;  $G$  — модуль сдвига.

В применяющейся схеме испытаний сдвиг неоднородный и подчиняется формуле (1). Тогда для упругой энергии, запасенной в образце до разрушения, получаем выражение

$$W = \frac{RS \tau_{\text{пр}}^2}{24G} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{4}{R} \Delta h_{\text{ВВ}} \right)^3 \right], \quad (3)$$

причем  $\Delta h_{\text{ВВ}} \leq \frac{R}{4}$ . Из формулы (3) видно, что с увеличением  $h_{\text{ВВ}}$  упругая энергия возрастает. Таким образом, ее рост при сдвиге с увеличением  $h_{\text{ВВ}}$  ведет к росту размеров очага, что приводит к снижению критических температур, а следовательно, и критических напряжений. Данные для октогена хорошо следуют этому заключению. Однако запасенная упругая энергия при сдвиге возрастает только до значений  $h_{\text{ВВ}} = R/4$  (в нашем случае  $R/4 = 1,25 \text{ мм}$ ). Это, в частности, сказывается в близости значений критических напряжений для зарядов октогена толщиной  $1$  и  $2 \text{ мм}$ .

Поступила в редакцию  
24/III 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М., «Наука». 1968.
2. Л. Г. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1959, 125, 570.

